

5. Гончаренко С.У. Український педагогічний словник / С.У. Гончаренко. – К.: Либідь, 1997. – 376 с.
6. Загальна психологія: Підручник / [О.В. Скрипченко, Л.В. Долинська, З.В. Огороднійчук та ін.]. – К.: Каравела, 2011. – 464 с.
7. Карамішева Н. В. Логіка (теоретична і прикладна): навч. посіб. / Н.В. Карамішева. – К.: Знання, 2011. – 455 с.
8. Касьян В.І. Філософія: Відповіді на питання екзаменаційних білетів: Навч. посіб. – 5-те вид., випр. і доп. – К.: Знання, 2008. – 347 с.
9. Коджаспирова Г.М. Словарь по педагогике / Коджаспирова Г.М., Коджаспиров А.Ю. – М.: ИКЦ "МарТ"; Ростов н/Д: "МарТ", 2005. – 448 с.
10. Концепції сучасного природознавства: Підручник/ Я. С. Карпов, В.В. Кисельник, В. Г. Кремень та ін. – К.: Професіонал, 2004. – 496 с.
11. Максименко С.Д. Загальна психологія: навчальний посібник / Максименко С.Д., Соловійченко В.О. К.: МАУП, 2000. – 256 с.
12. Методика і техніка навчального фізичного експерименту в основній школі: підручник для студентів вищих навчальних закладів / [Атаманчук П.С., Ляшенко О.І., Мендерецький В.В., Ніколаєв О.М.]. – Кам'янець-Подільський: Кам'янець Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2010. – 292 с.
13. Мойсеюк Н.Є. Педагогіка. Навчальний посібник / Н.Є. Мойсеюк. – К., 2007. – 656 с.
14. Моргулець О. Б. Менеджмент у сфері послуг: навч. посіб. / О. Б. Моргулець. – К.: Центр учбової літератури, 2012. – 384 с.
15. Педагогіка вищої школи: навч. посіб. / [З.Н. Курлянд, Р.І. Хмелюк, А.В. Семенова та ін.]; За ред. З.Н. Курлянд. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Знання, 2005. – 399 с.
16. Програми для загальноосвітніх навчальних закладів. Фізика. Астрономія. 7 – 12 класи. – К.: ВТФ "Перун", 2005, 2006. – 80 с.
17. Савчин М. В. Вікова психологія : навч. посіб. / М. В. Савчин, Л. П. Василенко. – 2-ге вид., доповн. – К.: Академ-видав, 2011. – 384 с.
18. Юрій М. Ф. Людина і світ / М.Ф. Юрій. – К.: Дакор, 2006. – 460 с.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Атаманчук Петро Сергійович – професор, доктор педагогічних наук, академік академії наук вищої освіти України, завідувач кафедри методики викладання фізики і дисциплін технологічної освітньої галузі Кам'янець-Подільського національного університету.

Коло наукових інтересів: проблеми методики навчання фізики.

Ніколаєв Олексій Михайлович – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри методики викладання фізики і дисциплін технологічної освітньої галузі Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка.

Коло наукових інтересів: проблеми методики навчання фізики.

МЕТОДИКА ПОГЛИБЛЕНОГО ВИВЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ВИСНОВКІВ РЕЛЯТИВІСТСЬКОЇ МЕХАНІКИ В СЕРЕДНІЙ ШКОЛІ

Володимир БУРАК, Олександр КОНОВАЛ

Обґрунтовано зміст і методику поглибленого вивчення кінематичних висновків релятивістської механіки з обов'язковим використанням перетворень Лорентца. Виділено основний навчальний матеріал і додатковий.

Grounded content and methodology depth study findings kinematic relativistic mechanics of Lorentz transformations using a must. The basic course material and additional.

Постановка проблеми. Вивчення релятивістської механіки в середній школі вкрай необхідне і має дуже важливе значення, оскільки це дає можливість ознайомити учнів з основними ідеями релятивістської фізики, які пов'язані з сучасними уявленнями про

простір і час, а також значно поглибити уявлення учнів про наукову картину світу і розширити їх науковий світогляд.

Розділ «Релятивістська механіка» в сучасному шкільному курсі фізики завершує частину фізики «Механіка» в 10 класі.

Поглиблене вивчення розділу «Релятивістська механіка» в сучасній українській школі здійснюють за вітчизняними підручниками авторів Т.М. Засєкіна, В.М. Головка [2] і Т.М. Засєкіна, Д.О. Засєкін [3]. У підручниках запропоновані цікаві й доступні для учнів варіанти виведення формул для релятивістського сповільнення часу та скорочення довжини. Але, на нашу думку, оскільки ці виведення не носять загального характеру, їх краще надавати у якості додаткового матеріалу. На жаль, є ряд серйозних фізичних помилок. Так, перетворення Лоренца записують з некоректним використанням знаку « \pm » (мали намір прямі та зворотні перетворення записати за один раз). Для релятивістського закону додавання швидкостей у підручнику [2] використали неправильну векторну формулу.

Поглиблене вивчення кінематичних висновків СТВу російському підручнику за редакцією А.А. Пінського, О.Ф. Кабардіна [4] здійснюється за таким змістом: 1. Граничність і абсолютність швидкості світла. 2. Постулати спеціальної теорії відносності. 3. Простір-час у спеціальній теорії відносності. У підручнику відсутня тема «Відносність відстаней», що не дає можливості повноцінно розкрити релятивістські властивості простору та простору-часу.

Автори вітчизняних [2], [3] і російського [4] підручників надають перетворення Лоренца в готовому виді без виведення і не використовують їх для виведення кінематичних висновків СТВ. У іншому російському підручнику авторів Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев [5] поглиблене вивчення СТВ обходиться без перетворень Лоренца. Натомість, часткове використання перетворень Лоренца для виведення кінематичних висновків СТВ започатковано ще в радянські часи за спеціальними навчальним посібником для поглибленого вивчення фізики Б.М. Яворського, А.А. Пінського [6] чи його новим виданням [7].

Ретельний аналіз здобутків і недоліків традиційної методики вивчення СТВ відображений нами в навчальному посібнику [8, С.12-85].

У цілому наявна методика вивчення СТВ має цілий ряд здобутків, але є багато недоліків як стосовно змісту виучуваного, так і стосовно методики вивчення окремих тем, у тому числі стосовно трактування фізичного змісту окремих понять, положень і співвідношень СТВ. Існує нагальна потреба удосконалення наявної методики.

Метадослідження полягає в удосконаленні змісту й методики поглибленого вивчення кінематичних висновків релятивістської механіки в середній школі.

Виклад основного матеріалу. Удосконалення здійснюємо з урахуванням *дидактичного принципу науковості*. Фізичний зміст усіх положень, принципів, законів, їх трактування й виведення повинні відповідати усталеним і перевіреним науковим поглядам. Це має особливе значення ще й тому, що наявні методики і шкільні підручники містять багато недоліків такого плану. Принцип науковості тісно переплітається з *дидактичним принципом фундаментальності* в навчанні, згідно якого весь навчальний матеріал повинен бути не тільки науково виваженим, але й зміст виучуваного повинен

охвати усі основні фундаментальні наукові положення, принципи й закони відповідного розділу фізики, у нашому випадку – релятивістської механіки (СТВ). Принцип фундаментальності передбачає формування в суб'єктів навчання цілісних уявлень з відповідного розділу фізики. Наявні шкільні підручники в тій чи іншій мірі не відповідають цьому важливому принципу [8, С.86-87]. Для належного упровадження дидактичних принципів науковості й фундаментальності ми враховуємо весь позитивний багаж вивчення СТВ у вищих навчальних закладах [9] – [12].

Зрозуміло, що фундаментальні наукові положення, принципи й закони повинні бути адаптовані до рівня середньої школи. У відповідності з *принципом доступності*, весь навчальний матеріал повинен бути зрозумілим і посильним для учнів. Зважене, оптимальне поєднання принципів науковості й фундаментальності з однієї сторони та принципу доступності з іншої дає змогу вибудувати науково виважений зміст й доступну методику вивчення СТВ.

На основі зазначеного ми вважаємо, що поглиблене вивчення СТВ повинно базуватися не тільки на детальному аналізі висновків СТВ стосовно відносності інтервалів часу, відносності довжини, релятивістського закону додавання швидкостей, на розкритті релятивістських властивостей чотиривимірного простору-часу, але й на використанні перетворень Лоренца хоча б у якості додаткового матеріалу. Важливість висвітлення перетворень Лоренца полягає, насамперед, у наступному: з них чітко видно як з однієї інерціальної системи відліку (ICB) перейти в іншу; з них можна вивести всі кінематичні наслідки СТВ, завдяки чому забезпечується доказова база і завершеність СТВ; прослідковується взаємозв'язок просторових координат з часом, що є фундаментом побудови чотиривимірного простору-часу; це є основою для розвитку відомостей про наукову картину світу і для формування наукового світогляду учнів.

Пропонуємо **зміст** навчального матеріалу розділу «Релятивістська механіка» наповнити наступними темами [8, С.156-157]:

1. Простір і час у класичній механіці. Механічний принцип відносності.
2. Постулати спеціальної теорії відносності. Швидкість світла у вакуумі.
3. Поняття події. Синхронізація годинників. Перетворення Лоренца.
4. Відносність часу і відстані в релятивістській механіці (Відносність одночасності подій. Відносність інтервалів часу. Відносність відстані).
5. Релятивістський закон додавання швидкостей.
6. Взаємозв'язок релятивістської та класичної механіки. Простір і час у релятивістській механіці та сучасній фізиці.

На вивчення цих тем потрібно 6 навчальних годин. Практично в кожному параграфі є головний матеріал і допоміжний. Надання значної частини більшості тем у якості додаткового навчального матеріалу дає змогу учням краще відділити головний матеріал від допоміжного у достатньо великих за обсягом параграфах і краще зрозуміти й засвоїти виучуване. Крім того, під час вивчення теми на уроці вчитель має можливість зосередити першочергову увагу на головному, а допоміжне розглянути стисло і задати його учням на домашнє завдання. Тим самим вже в тексті підручника ми закладаємо можливий варіант *організації самостійної роботи учнів*.

Коротко розглянемо методику вивчення цих тем [8, С.158-188].

1. Простір і час у класичній механіці. Механічний принцип відносності.

Залучення цієї теми значно полегшує подальше розуміння кінематичних висновків релятивістської механіки.

Починаємо з класичних уявлень про простір (необмежений, нерухомий, тривимірний евклідовий, однорідний, абсолютний) і час (одновимірний, однорідний, абсолютний). Актуалізуємо знання про ІСВ. Згадуємо і записуємо класичний закон Галілея для додавання швидкостей

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}, \quad (1.1)$$

де: \vec{v} – швидкість руху тіла відносно нерухомої СВ; \vec{v}' – швидкість руху тіла відносно рухомої СВ; \vec{V} – швидкість рухомої СВ відносно нерухомої СВ.

У якості додаткового матеріалу за відповідним рисунком виводимо *перетворення Галілея* для переходу від рухомої ІСВ (штрихованої) до нерухомої (нештрихованої) і навпаки [8, с.159]:

$$x = x' + Vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t', \quad (1.2)$$

$$x' = x - Vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'. \quad (1.3)$$

Пояснюємо [8, с.160]: 1) прискорення тіла відносно нерухомої СВ дорівнює прискоренню тіла відносно рухомої СВ (математичне доведення даємо в якості додаткового матеріалу); 2) *другий закон Ньютона* $\vec{F}_{\text{рівн}} = m \vec{a}$ однаковий в усіх ІСВ.

Формулюємо і розкриваємо *механічний принцип відносності Галілея-Ньютона*: *будь-яке механічне явище при однакових початкових умовах у всіх ІСВ протікає однаково, за однаковими законами*. Ніякими механічними дослідами всередині ІСВ неможливо встановити, перебуває ця ІСВ у спокої чи рухається прямолінійно і рівномірно. *Усі ІСВ рівнозначні (рівноправні)*, тобто результат аналізу будь-якого механічного явища в кожній з ІСВ однаковий.

2. Постулати спеціальної теорії відносності. Швидкість світла у вакуумі.

Спочатку аналізуємо протиріччя між електромагнетизмом Максвелла, відповідно до законів якого швидкість поширення електромагнітних хвиль, у тому числі світла у вакуумі, однакова в усіх ІСВ і рівна $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (так експеримент Майкельсона засвідчив, що швидкість поширення світла у вакуумі постійна і не залежить від того, нерухоме джерело світла, чи рухається) та класичного закону Галілея для додавання швидкостей (формула (1.1)), згідно якого швидкість світла мала би бути різною в різних ІСВ, які рухаються одна відносно одної (у якості прикладу розглядаємо рух ракети назустріч світловим променям, уздовж них і перпендикулярно до них) [8, с.162].

Пояснюємо: першим правильно вирішив наявне протиріччя Ейнштейн, який зрозумів, що при великих швидкостях, рівних швидкості світла чи близьких до неї, необхідно відмовитися від класичного закону додавання швидкостей і класичних уявлень про простір і час. У результаті на світ появилася (1905 р.) *спеціальна теорія відносності* або *релятивістська механіка*. Формулюємо і розкриваємо два основоположні *постулати (принципи) спеціальної теорії відносності*.

Перший принцип (постулат) – релятивістський принцип відносності Ейнштейна: *будь-яке фізичне явище в усіх ІСВ протікає однаково, за однаковими законами (при однакових початкових умовах)*. Ніякими дослідами (стосовно механічних, теплових,

електричних, магнітних, оптичних, атомних, ядерних й інших явищ) у середині ІСВ неможливо встановити, перебуває ця ІСВ у спокої чи рухається прямолінійно і рівномірно. *Усі ІСВ рівнозначні (рівноправні)*, тобто результат аналізу будь-якого явища (механічного, теплового, електричного, магнітного, оптичного й інших) у кожній з ІСВ однаковий. *Незалежність фізичних явищ (законів) від вибору ІСВ є одним з основних законів Всесвіту.*

Другий постулат – постулат сталості швидкості світла: швидкість поширення світла у вакуумі однакова в усіх ІСВ; вона не залежить ні від швидкості руху джерела, ні від швидкості руху приймача світла; швидкість поширення світла у вакуумі $c = 3 \cdot 10^8$ м/сє максимально можливою швидкістю в Природі (швидкістю передавання взаємодії в Природі).

Наводимо експериментальні приклади підтвердження другого постулату.

На завершення коротко зазначаємо про загальну теорію відносності.

3. Поняття події. Синхронізація годинників. Перетворення Лорентца.

Спочатку надаємо вихідне поняття СТВ «подія», яка характеризується чотирма числами x, y, z, t – місцем настання і часом настання події.

Пояснюємо суть синхронізації годинників у вибраній ІСВ [8, с.166].

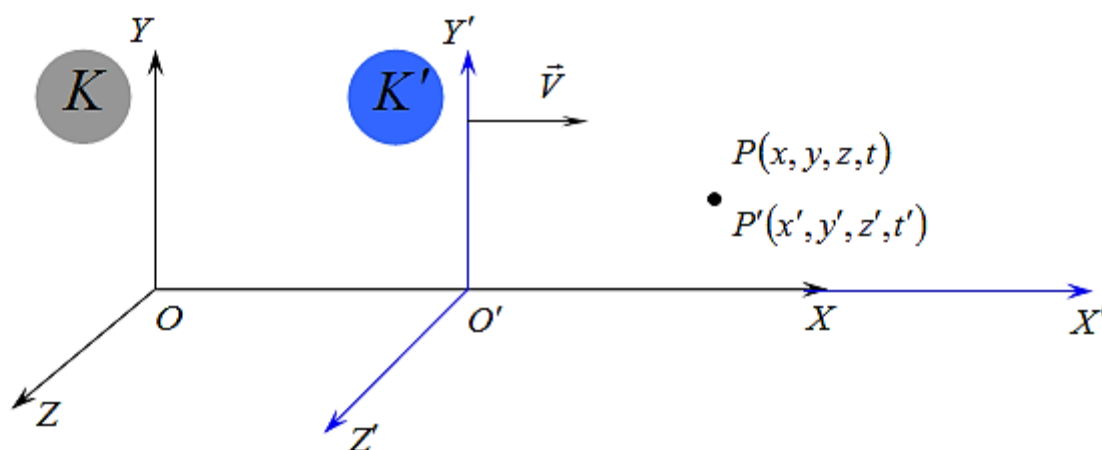


Рис.3. Нерухома ІСВ К і рухома ІСВ К'

Надаємо в готовому виді u які встановлюють зв'язок між x, y, z, t у нерухомій ІСВ K та x', y', z', t' однієї і тієї ж події рухомою ІСВ K' , яка рухається зі швидкістю \vec{V} відносно ІСВ K уздовж вісі OX (рис.3) [8, с.168] :

$$y' = y; \quad z' = z; \quad x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \quad t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (3.1)$$

та обернені перетворення Лоренца :

$$y' = y; \quad z' = z; \quad x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \quad t = \frac{t' + \frac{Vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (3.2)$$

Пояснюємо фізичний зміст перетворень:

1. Час у різних ІСВ протікає по різному, а зв'язок між часом у різних ІСВ залежить від координати місця події.

2. Релятивістські перетворення Лорентца, які справедливі при будь-яких швидкостях, прийшли на заміну класичним перетворенням Галілея, які справедливі тільки при малих швидкостях порівняно зі швидкістю світла у вакуумі. При малих швидкостях, коли $V \ll c$, релятивістські перетворення Лорентца переходять у класичні перетворення Галілея.

3. У класичній механіці маємо справу зі звичним тривимірним простором і незалежним від нього часом. У релятивістській механіці подія характеризується координатами і часом, які взаємозалежні між собою. Тому при великих швидкостях, наближених до швидкості світла у вакуумі, простір і час перестають бути незалежними один від одного, вони взаємопов'язані у чотиривимірний простір-час.

Для посилення доказової бази і розкриття логіки побудови СТВ, у якості додаткового матеріалу виводимо перетворення Лорентца на основі аналізу поширення світла (сферичної електромагнітної хвилі) в обох системах відліку (з проміжним висновком про інваріантність квадрату світлоподібного інтервалу $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$) та з урахуванням постулатів СТВ і однорідності простору й часу [8, с.169-171].

4. Відносність часу і відстані в релятивістській механіці.

Ця тема (параграф) містить три підтеми (підпараграфи).

Відносність одночасності подій.

Спочатку звертаємося до класичної механіки: якщо дві події, які відбуваються в різних точках простору, одночасні в будь-якій ІСВ, то вони обов'язково одночасні в усіх інших ІСВ незалежно від їх взаємного руху; одночасність подій у класичній механіці абсолютна [8, с.172].

На основі мисленого експерименту (з відповідним рисунком) зі спалахом двох лампочок відносно нерухомого спостерігача та спостерігача у космічному кораблі, який рухається прямолінійно і рівномірно, показуємо, що одні й ті самі дві просторово відокремлені події спалаху світла є одночасними для першого спостерігача та неодноразовими для другого.

Формулюємо висновок [8, с.173]: *Дві просторово відокремлені події, одночасні в одній ІСВ, є неодноразовими в інших ІСВ, які рухаються відносно першої. Одночасність подій відносна.* Пояснюємо, що причиною відносності одночасності є скінченність швидкості поширення світла.

У якості додаткового матеріалу обґрунтовуємо висновок на основі перетворень Лорентца.

Відносність інтервалів часу.

Починаємо з актуалізації знань з класичної механіки: *інтервал часу* (проміжок часу) між двома подіями, які відбулися в одній і тій же точці простору, однаковий в усіх ІСВ, незалежно від їх взаємного руху; інтервал (проміжок) часу в класичній механіці абсолютний [8, с.175].

Розглядаємо мислений експеримент з вимірюванням інтервалу часу між двома подіями (спалахами нерухомої лампи) відносно нерухомої ІСВ K і відносно рухомої ІСВ K' (космічного корабля), яка рухається прямолінійно і рівномірно зі швидкістю \vec{V} уздовж вісі OX (рис.4). У кожній системі відліку є нерухомий відносно неї годинник.

Пояснюємо, що в релятивістській механіці доведена формула

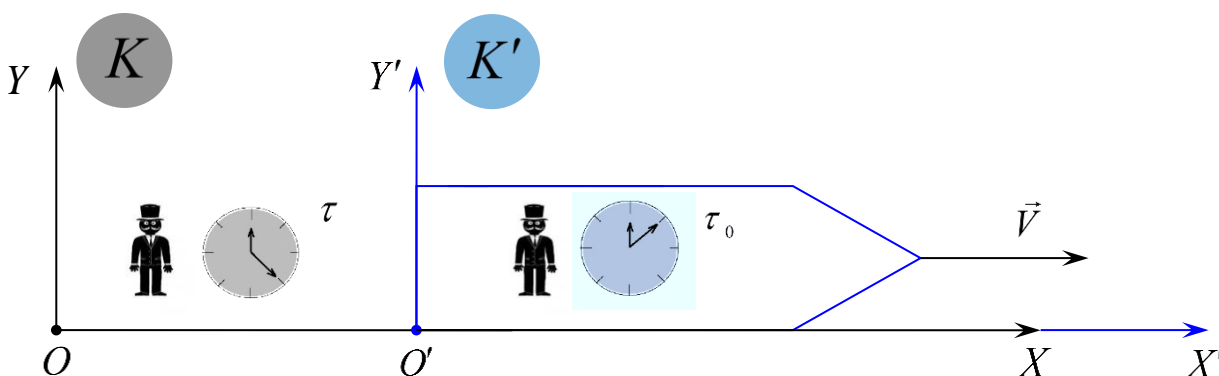


Рис. 4. Інтервал часу в різних ІСВ, які рухаються одна відносно одної, різний

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} . \quad (4.1)$$

і формулюємо висновок [8, с.176] :

Інтервал часу між двома подіями τ_0 , відлічений в одній точці ІСВ, у якій годинник перебуває в спокої (власний час), менший за інтервал часу τ між тими самими подіями, відлічений у ІСВ, відносно якої годинник рухається. Час у рухомій СВ уповільнюється відносно нерухомої СВ – це релятивістський ефект уповільнення часу. Інтервал часу є відносним (залежить від вибору СВ).

Інтервал часу між двома подіями має найменше значення в тій ІСВ, де відбуваються ці події – власний час τ_0 має найменше значення.

У якості експериментального підтвердження формули (4.1) наводимо з розрахунками приклади уповільнення часу під час радіоактивного розпаду ядер і для сучасного реактивного літака, який досягає швидкості декілька км/с. Пояснюємо, що при малих швидкостях релятивістським уповільненням часу можна знехтувати.

У якості додаткового матеріалу на основі перетворень Лорентца виводимо формулу (4.1) наступним чином [8, с.178].

Нехай у певній точці з координатою x' у рухомій ІСВ K' (рис.3) годинник реєструє тривалість деякого процесу, який почався в момент часу t'_1 , а закінчився в момент часу t'_2 . Тривалість цього процесу з точки зору ІСВ K' :

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \tau_0. \quad (4.2)$$

Годинник у нерухомій ІСВ K покаже відповідні моменти часу t_1 і t_2 . Тривалість того самого процесу (який протікає у певній точці рухомої ІСВ K') відносно нерухомої ІСВ K :

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \tau. \quad (4.3)$$

$$\text{Із перетворень Лорентца (3.2) маємо: } t_1 = \frac{t'_1 + \frac{Vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad t_2 = \frac{t'_2 + \frac{Vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (4.4)$$

Відніmemo в (4.4) від виразу t_2 вираз t_1 , урахуємо позначення (4.2) й (4.3) і отримаємо шуканий закон (4.1) для зв'язку тривалості процесу (інтервалу часу) в різних ІСВ.

На завершення наводимо з розрахунками цікавий приклад релятивістського сповільнення часу в «парадоксі близнюків».

Відносність відстані(довжини).

Починаємо з актуалізації знань з класичної механіки: *відстань* між двома точками простору однакова в усіх ІСВ, незалежно від їх взаємного руху.

Розглядаємо мислений експеримент (з відповідним рисунком) по вимірюванню довжини стержня відносно нерухомої ІСВ K і відносно рухомої ІСВ K' (космічного корабля), яка рухається прямолінійно і рівномірно зі швидкістю \vec{V} уздовж поздовжньої вісі стержня.

Пояснюємо, що в релятивістській механіці доведена формула

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \quad (4.5)$$

і формулюємо висновок [8, с.181-182]:

Довжина тіла l_0 , виміряна в ІСВ, відносно якої воно перебуває у спокої (власна довжина) більша за його довжину l в іншій ІСВ, відносно якої тіло рухається; довжина тіла у напрямі руху скорочується (відстань скорочується) з точки зору нерухомої ІСВ – це релятивістський ефект укорочення довжини рухомого тіла відносно нерухомої ІСВ. Довжина тіла (відстань) є відносною величиною(залежить від вибору СВ).

Довжина стержня l_0 є найбільшою в тій ІСВ, відносно якої він перебуває у стані спокою, а відносно іншої ІСВ, відносно якої стержень рухається, його довжина l у напрямі руху скорочується.

Наводимо приклад, що для релятивістського укорочення довжини стержня в два рази, він повинен рухатися зі швидкістю $V = \sqrt{3} c/2 \approx 2,6 \cdot 10^8$ м/с. Пояснюємо, що при малих швидкостях релятивістським укороченням довжини можна знехтувати.

У якості додаткового матеріалу на основі перетворень Лорентца виводимо формулу (4.5) наступним чином [8, с.183]. Власну довжину стержня l_0 , який знаходиться у спокої відносно рухомої ІСВ K' , знайдемо за різницею координат кінця і початку стержня у цій ІСВ:

$$l_0 = \Delta l' = x'_2 - x'_1. \quad (4.6)$$

Довжину стержня l відносно нерухомої ІСВ K знайдемо за різницею координат кінця і початку стержня у цій ІСВ :

$$l = \Delta l = x_2 - x_1. \quad (4.7)$$

Із перетворень Лорентца (3.1) маємо :

$$x'_1 = \frac{x_1 - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \quad x'_2 = \frac{x_2 - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (4.8)$$

Віднімемо в (4.8) від виразу x'_2 вираз x'_1 , урахуємо позначення (4.6) й (4.7) і отримаємо шуканий закон для зв'язку довжини в різних ІСВ :

$$l_0 = x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = \frac{l}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \Rightarrow l = l_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}.$$

5. Релятивістський закон додавання швидкостей.

Надаємо (з відповідним рисунком) у готовому виді *релятивістський закон додавання швидкостей* для переходу від рухомої ІСВ K' до нерухомої ІСВ K :

$$v_x = \frac{v'_x + V_x}{1 + \frac{v'_x \cdot V_x}{c^2}}, \quad (5.1)$$

де: \vec{v} – швидкість руху тіла уздовж вісі OX нерухомої ІСВ K ; \vec{v}' – швидкість руху тіла уздовж вісі $O'X'$ відносно рухомої ІСВ K' , яка в свою чергу рухається прямолінійно і рівномірно тіло зі швидкістю \vec{V} уздовж вісі OX відносно нерухомої ІСВ K ; усі швидкості записані в проекції на вісь OX .

Пояснюємо (з відповідними рисунками), що проекції швидкостей можуть бути як додатними, так і від'ємними.

Записуємо також релятивістський закон для зворотного переходу від нерухомої ІСВ K до рухомої ІСВ K' (у проекції на вісь OX):

$$v'_x = \frac{v_x - V_x}{1 - \frac{v_x \cdot V_x}{c^2}}. \quad (5.2)$$

Доводимо математично, що згідно релятивістського закону додавання швидкостей, швидкість світла не змінюється при переході від однієї ІСВ до іншої і є максимальною швидкістю в Природі.

Показуємо, що при малих швидкостях релятивістський закон Ейнштейна для додавання швидкостей переходить у класичний закон Галілея.

У якості додаткового матеріалу на основі перетворень Лорентца виводимо формулу (5.1) наступним чином [8, с.186-187].

Нехай за деякий малий інтервал часу Δt у нерухомій ІСВ K координата тіла (матеріальної точки) змінилася на Δx , відповідно в рухомій ІСВ K' за малий інтервал часу $\Delta t'$ координата змінилася на $\Delta x'$. Тоді з перетворень Лорентца (3.1) і (3.2) маємо:

$$\Delta x = \frac{\Delta x' + V_x \cdot \Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{V_x^2}{c^2}}}, \quad \Delta t = \frac{\Delta t' + \frac{V_x}{c^2} \Delta x'}{\sqrt{1 - \frac{V_x^2}{c^2}}},$$

де ми врахували проекцію швидкості V_x , з якою ІСВ K' рухається відносно нерухомої ІСВ K .

Поділимо перший з цих виразів на другий:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x' + V_x \cdot \Delta t'}{\Delta t' + \frac{V_x}{c^2} \Delta x'} = \frac{\frac{\Delta x'}{\Delta t'} + V_x}{1 + \frac{V_x}{c^2} \frac{\Delta x'}{\Delta t'}}.$$

Урахуємо, що $\frac{\Delta x}{\Delta t} = v_x$ та $\frac{\Delta x'}{\Delta t'} = v'_x$ і отримаємо шуканий релятивістський закон перетворення швидкостей (5.1).

6. Взаємозв'язок релятивістської та класичної механіки. Простір і час у релятивістській механіці та сучасній фізиці. Узагальнюємо відомості про час і відстань у релятивістській і класичній механіці та робимо висновок: релятивістська механіка не відкидає (не спростовує) класичну механіку, а визначає для неї границі використання – малі швидкості руху тіл порівняно зі швидкістю світла у вакуумі. У якості додаткового матеріалу надаємо принцип відповідності Бора [8, с.195].

Підкреслюємо, що при швидкостях, рівних чи наближених до швидкості світла у вакуумі: релятивістський ефект уповільнення часу в рухомій ІСВ відносно нерухомої ІСВ стосується часу як фізичної величини, яка характеризує послідовність і протяжність явищ і процесів у Всесвіті; релятивістський ефект укорочення відстані у напрямі руху відносно нерухомої ІСВ стосується безпосередньо просторових відрізків (відстаней); час і простір у релятивістській механіці стають відносними [8, с.196-197].

Більше того, у релятивістській механіці доведено, що простір (відстань) і час взаємно залежать один від одного. Це найкраще видно з перетворень Лорентца. У класичній механіці (при малих швидкостях) існує звичний тривимірний простір і одновимірний час, які не залежать один від одного (є абсолютними). У релятивістській механіці при великих швидкостях *існує єдиний чотиривимірний простір-час* (три вісі простору і одна вісь часу), у якому простір і час є відносними і утворюють одне ціле. При цьому і простір, і час у СТВ залишаються однорідними, тобто однаковими всюди у Всесвіті, як і в класичній механіці. Простір залишається Евклідовим (відповідає геометрії

Евкліда). Спеціальна теорія відносності Ейнштейна є фізичною теорією однорідного чотиривимірного простору-часу при великих швидкостях.

У якості додаткового матеріалу коротко пояснюємо, що в загальній теорії відносності Ейнштейна простір-час стає неевклідовим (викривленим) у місцях скупчення великих мас і поблизу них, особливо в області чорних дір. Також надаємо короткі відомості про темну матерію і темну енергію, вивчення яких відноситься до переднього краю сучасної астрофізики [8, с.198].

Висновки. 1. Удосконалення змісту й методики релятивістської механіки здійснено з урахуванням дидактичних принципів науковості, фундаментальності, доступності.

2. Обґрунтовано зміст і методику поглибленого вивчення кінематичних висновків релятивістської механіки з обов'язковим використанням перетворень Лорентца.

3. У кожній з тем виділено основний навчальний матеріал і додатковий, що дає змогу учням краще зрозуміти й засвоїти виучувану і сприяє організації самостійної роботи учнів.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Програма для загальноосвітніх навчальних закладів: Фізика. 10-11 класи. Рівень стандарту. Академічний рівень. Профільний рівень. – К. : «Поліграфкнига», 2010. – 64 с.
2. Засєкіна Т.М. Фізика : підручник для 10 кл. загальноосвіт. навч. закладів: профільний рівень / Т.М. Засєкіна, В.М. Головка. – К.: Педагогічна думка, 2010. – 304 с.
3. Засєкіна Т.М. Фізика : підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл. : академ. рівень, профіл.рівень / Т.М. Засєкіна, Д.О. Засєкін – Харків : Сиція, 2012. – 352 с.
4. Пинский А.А. Физика. Учебник для 11 кл. с углубл. изучением физики. 8-е изд. / А.Т. Глазунов, О.Ф. Кабардин, А.Н. Калинин, В.А. Орлов, А.А. Пинский; Под ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. – М. : Просвещение, 2005. – 448 с.
5. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс : учеб.для общеобразоват. Учреждений : базовый и профил. уровни / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, И.М. Чагурин – 19-е изд. – М. :Просвещение, 2010.– 399 с.
6. Яворский Б.М. Основы физики. Т. 1: Учебное пособие для средней школы. 3-е изд. / Б.М. Яворский, А.А. Пинский. – М. : Наука, 1981. – 476 с.
7. Яворский Б.М. Основы физики. Т. 1: Учебное пособие для средней школы / Б.М. Яворский, А.А. Пинский. – М. :Физматлит, 2003. – 576 с.
8. Бурак В. І. Методика вивчення спеціальної теорії відносності в середній школі в умовах профільної диференціації навчання : навч.-метод. посіб. для самост. роб. студ. вищ. пед. навч. закл. / В. І. Бурак, О. А. Коновал, Т. І. Туркот ; за ред. проф. О. А. Коновала. – Кривий Ріг : КП ДВНЗ «КНУ», 2014. – 285 с.
9. Детлаф А.А. Курс физики : учеб.пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский – М. : Высш. шк., 1989. – 608 с.
10. Коновал О.А. Основы спеціальної теорії відносності : [навч. посіб. для студ. вищ. пед. навч. закл.] / О.А. Коновал; Криворізький педагогічний інститут. – Кривий Ріг : КП ДВНЗ «КНУ», 2014. – 258 с.
11. Коновал О.А. Науково-методичний аналіз методів обґрунтування перетворень Лорентца : навчальний посібник для самостійної роботи студентів / О.А. Коновал. - Кривий Ріг : КП ДВНЗ «КНУ», 2014. – 137 с.
12. Кучерук І.М. Загальний курс фізики. Т. 1 : Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка : Навч. посібник для студентів вищих техн. і педагог. закладів освіти / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик – К. :Техніка, 1999. – 536 с.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Бурак Володимир Іванович – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики та методики її навчання Криворізького педагогічного інституту ДВНЗ «Криворізький національний університет».

Коновал Олександр Андрійович – доктор педагогічних наук, професор кафедри фізики та методики її навчання Криворізького педагогічного інституту ДВНЗ «Криворізький національний університет».

Коло наукових інтересів: теорія та методика навчання фізики у вищій та середній школі.